橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼幼鱼生长性能、消化酶活性、脂蛋白含量和抗氧化功能的影响

张新党　张　曦　陶琳丽　杨秀娟　毕保良　邓君明*

（云南农业大学动物科学技术学院，昆明 650201）

摘　要：本试验旨在研究橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼幼鱼生长性能、消化酶活性、脂蛋白含量和抗氧化功能的影响。选择大小均匀、体格健壮的吉富罗非鱼鱼苗 600 尾，随机分为 5 个组，每组 3 个重复，每个重复 40 尾鱼。5 组试验鱼分别投喂以橡胶籽油分别替代 0（对照）、25%、50%、75% 和 100%鱼油的 5 种等氮等能饲料，分别记为 G0、G25、G50、G75、G100。试验期为 8 周。结果表明：1)橡胶籽油替代不同比例鱼油对罗非鱼幼鱼的末重、体增重、日增重系数、摄食率、饲料系数和蛋白质效率均无显著影响(P＞0.05)。2)G25 组罗非鱼幼鱼肠道胰蛋白酶和脂肪酶活性显著高于其他各组(P＜0.05)，G25 组罗非鱼幼鱼肠道淀粉酶活性显著高于 G75 组(P＜0.05)。橡胶籽油替代不同比例鱼油对罗非鱼幼鱼肝脏胰蛋白酶、淀粉酶和二糖酶活性均无显著影响(P＞0.05)。3)随着橡胶籽油替代鱼油比例的提高，罗非鱼幼鱼血清总胆固醇(TC)和低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)含量大体上呈下降的趋势，肝脏游离胆固醇(FC)含量及 FC/TC 呈先下降后上升的趋势，其中以 G25 组最低。4)G0 组罗非鱼幼鱼血浆谷胱甘肽还原酶(GR)活性显著高于其他各组(P＜0.05)，G0 组罗非鱼幼鱼肝脏 GR 活性显著高于 G50 和 G100 组(P＜0.05)，G100 组罗非鱼幼鱼肝脏总抗氧化能力显著低于其他各组(P＜0.05)。由此可见，橡胶籽油替代 25%~75%鱼油对罗非鱼幼鱼生长性能和抗氧化功能均无明显负面影响。橡胶籽油替代 25%鱼油有利于改善罗非鱼幼鱼肠道消化酶活性；橡胶籽油替代 100%鱼油时，罗非鱼幼鱼抗氧化功能下降。

关键词：吉富罗非鱼；橡胶籽油；鱼油；生长性能；消化酶活性；抗氧化功能

收稿日期：2017-09-04

基金项目：云南农业大学杰出人才专项(2015JY04)；云南省淡水渔业产业技术体系专项(2017KJT0019)；云南省应用基础研究面上项目(2014FB143)；云南省科技创新强省计划(2014AB003)

作者简介：张新党（1992–），女，河南开封人，硕士研究生，从事水产动物营养与饲料研究。E-mail: zxdang1108@163.com

*通信作者：邓君明，教授，博士生导师，E-mail: djunming@163.com

中图分类号：S963　　　　　文献标识码：　　　　　文章编号：

脂类不仅能够提供动物所需的必需脂肪酸和能量，而且还可起到调节动物机体免疫的作用[1]。适当脂肪源供应不仅能够节约蛋白质、减少环境污染，同时还可降低饲料成本[2]。鱼油因其富含多种不饱和脂肪酸，一直是水产饲料中的优质脂肪源。然而，随着水产养殖业的快速发展，对鱼油的需求也在迅速增长，导致鱼油价格也随之上涨[3]。因此，寻找廉价鱼油替代源成为水产动物营养与饲料学研究领域的热点之一[4]。

橡胶籽作为橡胶树的一种副产品，来源丰富且廉价，但95%橡胶籽被废弃于橡胶林中，未得到有效利用。橡胶籽油是从橡胶籽中提取的一种木本植物油，是一种理想的能量来源[5]。橡胶籽油中不饱和脂肪酸含量高达74.52%，且其α-亚麻酸含量高达20%~24%，是大豆油和菜籽油的3~4倍[6]，是花生油和葵花籽油的数十倍[7]。前期研究表明，长期食用橡胶籽油对高脂血症具有很好的预防作用[8-9]。因此，橡胶籽油可作为鱼油、大豆油等常规饲料脂肪源的替代源。

吉富罗非鱼(genetically improved farmed tilapia，GIFT)是近年经过遗传育种选育后的优良品系，具有生长速度快、出肉率高等优点；同时也是我国出口的重要水产养殖品种之一，具有很高的经济价值[10]。近年来，鱼类营养学家对其营养需求量和健康免疫[11]等方面进行了广泛的研究，但未见橡胶籽油在吉富罗非鱼饲料中应用的研究报道。目前，关于罗非鱼对必需脂肪酸(EFA)需要种类还存在着以下分歧：1）罗非鱼只需要n-6多不饱和脂肪酸(PUFA)作为EFA[12]；2）n-6 PUFA和n-3 PUFA作用效果等同[13]；3）除n-6 PUFA外，添加n-3 PUFA对罗非鱼生长有加成作用[14]。因此，本试验利用橡胶籽油替代不同比例鱼油构建不同n-3/n-6 PUFA比例，研究其对吉富罗非鱼幼鱼生长性能、消化酶活性、脂蛋白含量和抗氧化功能的影响，旨在为橡胶籽油在吉富罗非鱼饲料中的应用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验饲料

以鱼粉、豆粕、菜籽粕和玉米蛋白粉作为蛋白质源，以橡胶籽油分别替代 0(对照)、25%、50%、75%和 100%的鱼油，配制 5 种等氮等能饲料(粗蛋白质水平 33%，总能 19.4 MJ/kg)，分别记为 G0、G25、G50、G75 和 G100。试验饲料组成及营养水平见表 1，脂肪酸组成见表 2。

表 1　试验饲料组成及营养水平(干物质基础)

Table 1　Composition and nutrient levels of experimental diets (DM basis)　　%

项目 Items	饲料 Diets				
	G0	G25	G50	G75	G100
原料 Ingredients					
鱼粉 Fish meal[1)]	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
玉米蛋白粉 Corn gluten meal	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
豆粕 Soybean meal	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
菜籽粕 Rapeseed meal	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00
鱼油 Fish oil[1)]	5.20	3.90	2.60	1.30	
橡胶籽油 Rubber seed oil		1.30	2.60	3.90	5.20
蛋氨酸 Methionine	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
次粉 Wheat middling	33.60	33.60	33.60	33.60	33.60
α–淀粉α–starch	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
大豆卵磷脂 Phospholipids	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
抗氧化剂 Antioxidant	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
维生素 C 磷酸酯 Vitamin C phosphate (30%)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
磷酸二氢钙 $Ca(H_2PO_4)_2$	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
食盐 NaCl	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
氯化胆碱 Choline chloride (50%)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
维生素预混料 Vitamin premix[2)]	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
矿物质预混料 Mineral premix[3)]	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels					
干物质 Dry matter	92.62	91.81	92.81	91.43	92.45
粗蛋白质 Crude protein	33.23	33.38	33.52	33.90	33.56
粗脂肪 Ether extract	8.12	8.39	8.29	8.21	8.27
粗灰分 Ash	5.84	5.98	5.83	5.90	5.81
总能 Cross energy/（MJ/kg)	19.37	19.41	19.42	19.43	19.43

[1)]购自于云南昆明新海丰水产科技集团有限公司。They were obtained from *Yunnan Kunming* New ocean group Co., Ltd..

[2)]矿物质预混料为每千克饲料提供 The mineral premix provided the following per kg of diets：$MgSO_4$•$7H_2O$ 900 mg，KI 5 mg，$FeSO_4$•H_2O 1 300 mg，$ZnSO_4$•H_2O 900 mg，$CuSO_4$•$5H_2O$ 125 mg，$Na_2Se_2O_3$ 0.05 mg，$MnSO_4$•H_2O 900 mg，$CoCl_2$•$6H_2O$ 3.75 mg。

[3)]维生素预混料为每千克饲料提供 The vitamin premix provided the following per kg of diets：VA 10 mg，VD_3 0.15 mg，VE 150 mg，VK 15 mg，盐酸硫胺 thiamine hydrochloride 40 mg，核黄素 riboflavin 55 mg，盐酸吡哆醇 pyridoxine hydrochloride 40 mg，VB_{12} 0.1 mg，抗坏血酸 ascorbic acid 250 mg，叶酸 folic acid 5 mg，生物素 biotin 0.5 mg，烟酸 niacin 150 mg，泛酸钙 calcium pantothenate 160 mg，肌醇 inositol 125 mg。

表 2　试验饲料脂肪酸组成(风干基础，占总脂肪酸的百分比)

Table 2　Fatty acid composition of experimental diets (air-dry basis, percentage of total fatty acids)　　　%

项目 Items	饲料 Diets				
	G0	G25	G50	G75	G100
豆蔻酸 C14:0	0.78	0.75	0.71	0.70	0.68
软脂酸 C16:0	21.62	17.66	14.28	11.36	8.74
硬脂酸 C18:0	6.64	7.00	7.29	7.56	7.74
花生酸 C20:0	0.37	0.32	0.30	0.26	0.25
油酸 C18:1n-9	26.70	25.65	24.73	23.98	23.12
花生一烯酸 C20:1n-9	2.66	1.93	1.33	0.79	0.32
亚油酸 C18:2n-6	11.56	19.10	25.52	31.13	35.74
亚麻酸 C18:3n-3	3.69	7.65	11.11	13.95	16.39
二十碳五烯酸 C20:5n-3	10.39	8.22	6.36	4.76	3.33
二十二碳六烯酸 C22:6n-3	15.58	11.70	8.37	5.50	3.70
n-3/n-6	2.57	1.44	1.01	0.78	0.66

配制饲料前，所有原料必需经过粉碎机(SFSP 系列，昆明华明粮油设备厂生产)粉碎，且全部过

60 目筛。将所有粉碎好的饲料原料按配方混匀后加入鱼油、橡胶籽油和大豆卵磷脂(先溶于鱼油或橡胶籽油中)，手工将油脂微粒搓散、混匀，最后再加入适宜蒸馏水使粉状饲料成团，于颗粒饲料机(KS-180，江苏晶谷米机有限公司生产)中将饲料挤压成直径 1.5 mm 的条状，用恒温烘箱在 40 ℃恒温下干燥 12 h，置–20 ℃冰箱保存备用。

1.2　试验设计及饲养管理

试验用吉富罗非鱼幼鱼为当年人工培育的同一批苗种，由云南省西双版纳州水产技术推广站提供。试验开始前禁食 24 h，选择大小均匀(初始平均体重 1.92 g)、体格健壮的罗非鱼鱼苗 400 尾，随机分为 5 个组，每组 3 个重复，每个重复 40 尾鱼。5 组试验鱼分别投喂 5 种等氮等能饲料，并按照对应饲料编号记为 G0、G25、G50、G75 和 G100 组。鱼苗随机分配于 15 个养殖网箱(0.9 m×0.9 m×1.0 m)中，每个网箱 40 尾鱼。试验期 8 周。

试验于云南农业大学动物科学技术学院水产养殖学实验室中进行。试验前，试验幼鱼暂养 2 周适应环境。每天早晚投饵 2 次(07:00、17:00)，达饱食水平。下午投喂结束后 30 min，吸出残饵及粪便。养殖用水为曝气自来水，采用循环流水系统，循环系统采用机械和生物介质过滤。养殖期间不间断充氧，自然光照，水温 26~28 ℃。

1.3　样品采集

养殖试验结束禁食 24 h 后，称量每个网箱鱼体总重，记录鱼体个数，计算罗非鱼生长性能；并于每网箱随机取 6 尾鱼作为全鱼样品，分析测定鱼体常规组成。此外，每网箱随机另取 6 尾鱼，麻醉后尾静脉取血，一部分收集于普通离心管中，一部分收集于抗凝离心管中，在 4 000 r/min 下离心 10 min，所得血清、血浆样品在-80 ℃下保存备用；随后从其中选取 3 尾鱼，解剖后将完整的肠、肝脏取出，剥去脂肪，去除其内容物后装于密封袋中，-80 ℃保存。

1.4　分析测试方法

鱼体和饲料常规成分中水分含量采用 105 ℃烘干恒重法测定，粗蛋白质含量采用凯氏定氮法(JK9830，济南精密科学仪器仪表有限公司)测定，粗脂肪含量采用索氏提取法(以石油醚为溶剂)测定，

粗灰分含量采用 550 ℃灼烧法(16 h，箱式电阻炉 SX-410，北京市永光明医疗仪器有限公司)测定，总能采用氧弹式能量仪(ZDHW-6，鹤壁市华泰仪器仪表有限公司)测定。饲料中脂肪酸的组成分析采用硫酸−甲醇脂化法方法，用高效气相色谱仪(GC-2014，日本岛津公司)测定。

血清、血浆、肝脏、肠道的生化指标均采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒，按照使用说明书进行操作。其中，肝脏和肠道中胰蛋白酶采用紫外比色法测定，淀粉酶(AMS)活性采用碘-淀粉比色法测定，脂肪酶(LPS)、二糖酶活性采用比色法测定。血清和肝脏中总胆固醇(TC)含量采用氧化酶法测定，甘油三酯(TG)含量采用甘油氧化酶法测定，高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)含量采用选择性沉淀法测定，游离胆固醇(FC)含量、谷氨酸脱氢酶(GDH)活性采用双抗体夹心法测定，胆固醇酯(CE)含量由总胆固醇减去游离胆固醇所得。血浆和肝脏中尿素氮(UN)含量采用脲酶法测定，碱性磷酸酶(ALP)活性采用连续监测法测定，谷草转氨酶(AST)、谷丙转氨酶(ALT)活性采用赖氏法测定，免疫球蛋白 M(IgM)含量、谷胱甘肽还原酶(GR)活性采用紫外比色法测定，一氧化氮(NO)、丙二醛(MDA) 含量和过氧化物酶(POD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、谷氨酰转肽酶(GGT)、过氧化氢酶(CAT)活性以及总抗氧化能力(T-AOC)均采用可见光法测定，总蛋白（TP）含量采用考马斯亮兰法测定。

1.5　指标计算

体增重（weight gain，WG）=（末重-初重）/初重；

日增重系数（daily gain coefficient，DGC，%/d）=100×（末重 $^{1/3}$-初重 $^{1/3}$）/饲喂天数；

平均代谢体重（mean metabolize weight，MBW，kg）=[（初重/1 000）$^{0.75}$+（末重/1 000）$^{0.75}$]/2；

摄食率（feeding rate，FR， g/kg•d MBW）=总摄食量/（平均代谢体重×饲喂天数）[15]；

饲料系数（feed conversion ratio，FCR）=投饲总量 / （末重－初重）；

蛋白质效率（protein efficiency ratio, PER，%）=(末重－初重)/蛋白质摄入量；

存活率（survival rate，SR，%）＝100×终末尾数 / 初始尾数。

1.6　数据统计与分析

所有统计分析均采用 SPSS 17.0 软件进行分析。所有百分率数据分析统计前均先经 Arcsine 转换。

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)，当组间存在显著差异(P<0.05)时，用 Duncan 氏法多重比较检验。所有试验结果均用平均值±标准误(means±SEM)表示。

2 结 果

2.1 橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼幼鱼生长性能的影响

由表 3 可知，各组罗非鱼幼鱼成活率为 98.30%～100.00%，各组间成活率无显著差异(P>0.05)。各组间罗非鱼幼鱼末重、体增重、日增重系数、摄食率、饲料系数和蛋白质效率均无显著差异(P>0.05)。

表 3 橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼生长性能的影响

Table 3 Effects of fish oil replacement by rubber seed oil on growth performance of juvenile GIFT

项目	组别 Groups				
Items	G0	G25	G50	G75	G100
初重 IBW/g	1.92±0.01	1.91±0.01	1.92±0.00	1.92±0.01	1.92±0.01
末重 FBW/g	46.15±1.31	47.74±1.28	46.32±0.90	45.57±0.89	44.86±1.19
体增重 WG	23.04±0.74	23.98±0.71	23.10±0.45	22.76±0.59	22.34±0.57
日增重系数 DGC/(%/d)	4.18±0.06	4.26±0.06	4.19±0.04	4.16±0.05	4.13±0.06
摄食率 FR/(g/kg•d MBW)	13.91±0.24	13.39±0.22	13.77±0.12	13.86±0.06	13.95±0.23
饲料系数 FCR	0.96±0.03	0.91±0.02	0.94±0.01	0.96±0.01	0.97±0.02
蛋白质效率 PER/%	3.14±0.08	3.29±0.09	3.15±0.04	3.08±0.03	3.07±0.05
存活率 SR/%	100.00±0.00	98.30±1.70	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著（P<0.05），相同或无字母表示差异不显著（P>0.05）。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference (P<0.05), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference (P>0.05). The same as below.

2.2 橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼幼鱼肠道、肝脏消化酶活性的影响

由表 4 可知，G25 组罗非鱼幼鱼肠道胰蛋白酶和脂肪酶活性显著高于其他各组(P<0.05)；G25 组罗非鱼幼鱼肠道淀粉酶活性显著高于 G75 组(P<0.05)，而与其他各组差异不显著(P>0.05)；G0 和 G25 组罗非鱼幼鱼肠道二糖酶活性显著高于 G50、G75 和 G100 组(P<0.05)。各组间罗非鱼幼鱼肝脏胰蛋白酶、淀粉酶和二糖酶活性均无显著差异(P>0.05)。

表 4　橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼幼鱼肠道、肝脏消化酶活性的影响

Table 4　Effects of fish oil replacement by rubber seed oil on digestive enzyme activities in intestine and liver of juvenile GIFT

项目 Items	组别 Groups				
	G0	G25	G50	G75	G100
肠道 Intestine					
胰蛋白酶 Trypsin/(U/μg prot)	2.33±0.14[a]	3.96±0.24[b]	1.98±0.20[a]	1.92±0.17[a]	2.33±0.40[a]
脂肪酶 Lipase/(U/g prot)	6.47±0.37[a]	9.68±0.61[b]	5.35±0.82[a]	3.88±0.44[a]	5.80±0.80[a]
淀粉酶 Amylase/(U/mg prot)	0.18±0.00[ab]	0.23±0.03[b]	0.16±0.01[ab]	0.15±0.01[a]	0.18±0.01[ab]
二糖酶 Disaccharidase/(U/mg prot)	4.54±0.31[b]	4.66±0.40[b]	2.66±0.24[a]	2.21±0.37[a]	2.47±0.05[a]
肝脏 Liver					
胰蛋白酶 Trypsin/(U/μg prot)	0.25±0.01	0.28±0.05	0.24±0.01	0.27±0.04	0.26±0.02
淀粉酶 Amylase/(U/mg prot)	0.27±0.04	0.30±0.04	0.27±0.02	0.29±0.03	0.22±0.01
二糖酶 Disaccharidase/(U/mg prot)	69.56±7.67	69.83±6.36	53.48±4.03	56.56±3.29	69.58±9.35

2.3　橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼幼鱼血清、肝脏脂肪代谢相关指标的影响

由表 5 可知，随着饲料中橡胶籽油替代鱼油比例的提高，罗非鱼幼鱼血清 TC 和 LDL-C 含量及 LDL-C/HDL-C 大体上呈下降的趋势；其中，G0 组罗非鱼幼鱼血清 TC 含量显著高于 G75 组($P<0.05$)，G0 和 G25 组罗非鱼幼鱼血清 LDL-C 含量和 LDL-C/HDL-C 显著高于 G50、G75 和 G100 组($P<0.05$)。各组间罗非鱼幼鱼血清 TG 和 HDL-C 含量无显著差异($P>0.05$)。

随着饲料中橡胶籽油替代鱼油比例的提高，罗非鱼幼鱼肝脏 FC 含量及 FC/TC 呈先下降后上升的趋势；其中，G25 组罗非鱼幼鱼肝脏 FC 含量和 FC/TC 最低，显著低于 G0 和 G100 组($P<0.05$)。反之，随着饲料中橡胶籽油替代鱼油比例的提高，罗非鱼幼鱼肝脏 CE 含量呈先上升后下降的趋势；其中，G25 组罗非鱼幼鱼肝脏 CE 含量最高，显著高于 G0 和 G100 组($P<0.05$)。各组间罗非鱼幼鱼肝脏 TC 和 TG 含量均无显著差异($P>0.05$)。

表 5　橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼幼鱼血清、肝脏脂肪代谢相关指标的影响

Table 5　Effects of fish oil replacement by rubber seed oil on lipid metabolism related indexes in serum

and liver of juvenile GIFT

项目 Items	组别 Groups				
	G0	G25	G50	G75	G100
血清 Serum					
总胆固醇 TC/(mmol/L)	3.31±0.22[b]	3.05±0.03[ab]	2.81±0.04[ab]	2.64±0.14[a]	2.89±0.09[ab]
甘油三酯 TG/(mmol/L)	1.54±0.18	1.59±0.37	2.66±0.51	1.93±0.39	1.67±0.12
高密度脂蛋白胆固醇 HDL-C/(mmol/L)	2.27±0.23	2.04±0.16	2.06±0.13	2.10±0.12	2.40±0.07
低密度脂蛋白胆固醇 LDL-C/(mmol/L)	0.73±0.01[b]	0.69±0.05[b]	0.22±0.04[a]	0.16±0.04[a]	0.16±0.04[a]
高密度脂蛋白胆固醇/低密度脂蛋白胆固醇 LDL-C/HDL-C	0.33±0.03[b]	0.35±0.06[b]	0.11±0.02[a]	0.08±0.02[a]	0.07±0.01[a]
肝脏 Liver					
总胆固醇 TC/(mg/g)	0.84±0.05	1.03±0.10	1.04±0.03	0.92±0.05	0.89±0.04
甘油三酯 TG/(mg/g)	3.93±0.54	4.20±0.67	4.58±0.48	4.21±0.20	4.17±0.20
游离胆固醇 FC/(mg/g)	0.55±0.03[b]	0.36±0.06[a]	0.48±0.06[ab]	0.51±0.01[ab]	0.74±0.02[c]
胆固醇酯 CE/(mg/g)	0.29±0.02[ab]	0.67±0.05[d]	0.56±0.08[cd]	0.41±0.06[bc]	0.14±0.03[a]
游离胆固醇/总胆固醇 FC/TC	0.65±0.02[c]	0.35±0.02[a]	0.47±0.07[ab]	0.56±0.04[bc]	0.84±0.03[d]

2.4 橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼幼鱼血浆、肝脏蛋白质代谢相关指标的影响

由表 6 可知，G25 组罗非鱼幼鱼血浆 GGT 活性显著高于 G50 和 G75 组(P<0.05)。各组间罗非鱼幼鱼血浆 TP、UN 含量及 AST、ALT 活性均无显著差异(P>0.05)。各组间罗非鱼幼鱼肝脏 ALT、AST 和 GGT 活性均无显著差异(P>0.05)。

表 6 橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼幼鱼血浆、肝脏蛋白质代谢相关指标的影响

Table 6 Effects of fish oil replacement by rubber seed oil on protein metabolism related indexes in plasma and liver of juvenile GIFT

项目 Items	组别 Groups				
	G0	G25	G50	G75	G100
血浆 Plasma					
总蛋白 TP/(g/L)	30.13±0.84	29.34±0.78	32.10±0.20	31.71±1.03	31.61±1.09
尿素氮 UN/(mmol/L)	6.91±0.62	6.17±0.65	7.65±0.62	7.65±1.10	7.41±0.57
谷草转氨酶 AST/(U/L)	45.81±9.46	40.98±5.75	55.59±8.90	40.40±5.33	47.88±7.34
谷丙转氨酶 ALT/(U/L)	24.44±2.94	16.43±1.91	22.83±1.96	19.30±0.60	17.97±1.56
谷氨酰转肽酶 GGT/(U/L)	4.96±0.41[ab]	6.20±0.31[b]	3.10±0.41[a]	3.57±0.41[a]	4.19±0.71[ab]

肝脏 Liver					
谷草转氨酶 AST/(U/g prot)	14.37±1.17	14.56±0.79	12.62±0.37	13.30±1.01	13.55±0.82
谷丙转氨酶 ALT/(U/g prot)	13.28±0.61	10.42±0.45	12.45±2.80	12.45±1.97	16.72±0.77
谷氨酰转肽酶 GGT/(U/g prot)	0.38±0.07	0.28±0.04	0.35±0.06	0.36±0.03	0.26±0.04

2.5 橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼幼鱼血浆、肝脏抗氧化指标的影响

由表 7 可知，G0 组罗非鱼幼鱼血浆 GR 活性显著高于其他各组(P<0.05)；G50 组罗非鱼幼鱼血浆 NO 含量显著低于 G100 组(P<0.05)，而与其他各组差异不显著(P>0.05)。各组间罗非鱼幼鱼血浆 CAT、GSH-Px、POD、ALP、GDH 活性及 IgM、MDA 含量均无显著差异(P>0.05)。G0 组罗非鱼幼鱼肝脏 GR 活性显著高于 G50 和 G100 组(P<0.05)。G100 组罗非鱼幼鱼肝脏 T-AOC 显著低于其他各组(P<0.05)。各组间罗非鱼幼鱼肝脏 CAT、POD、ALP、GDH 活性及 MDA 含量均无显著差异(P>0.05)。

表 7 橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼幼鱼血浆、肝脏抗氧化指标的影响

Table 7 Effects of fish oil replacement by rubber seed oil on antioxidant indexes in plasma and liver of juvenile GIFT

项目 Items	组别 Groups				
	G0	G25	G50	G75	G100
血浆 Plasma					
过氧化氢酶 CAT/(U/mL)	2.97±0.15	3.07±0.18	3.37±0.30	3.07±0.62	2.65±0.66
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/(U/mL)	0.27±0.04	0.25±0.01	0.29±0.01	0.31±0.01	0.32±0.03
谷胱甘肽还原酶 GR/(U/mL)	51.45±3.71^{b}	27.87±2.14^{a}	27.87±2.14^{a}	27.87±2.14^{a}	34.30±2.14^{a}
过氧化物酶 POD/(U/mL)	64.89±9.82	54.52±6.50	55.41±3.35	53.11±0.67	63.70±2.57
碱性磷酸酶 ALP/(U/dL)	6.74±0.32	5.88±0.84	6.19±0.48	5.64±0.58	5.51±0.38
谷氨酸脱氢酶 GDH/(U/L)	53.82±8.63	59.82±3.40	45.08±6.84	62.03±1.58	53.01±2.42
一氧化氮 NO/(μmol/L)	43.33±5.30^{ab}	33.81±7.21^{ab}	17.14±8.61^{a}	48.57±8.69^{ab}	51.43±5.77^{b}
免疫球蛋白 IgM/(g/L)	0.12±0.01	0.11±0.00	0.13±0.01	0.12±0.00	0.13±0.01
丙二醛 MDA/(μmol/L)	4.53±0.56	2.99±0.31	3.50±0.15	5.04±0.90	4.36±0.27
肝脏 Liver					
过氧化物酶 CAT/(U/mg prot)	31.16±0.93	28.73±2.78	34.41±3.09	32.01±2.19	32.19±0.63
谷胱甘肽还原酶 GR/(U/g prot)	33.62±4.51^{b}	25.03±2.06^{ab}	19.69±0.58^{a}	22.15±2.78^{ab}	17.29±0.66^{a}
过氧化物酶 POD/(U/mg prot)	13.99±2.10	15.51±0.58	12.61±1.22	14.84±0.83	10.29±1.26
总抗氧化能力 T-AOC/(U/mg prot)	0.46±0.07^{b}	0.42±0.04^{b}	0.49±0.09^{b}	0.46±0.06^{b}	0.17±0.01^{a}

碱性磷酸酶 ALP/(U/g prot)	67.30±9.58	62.42±3.85	65.36±5.34	57.42±7.42	57.61±4.17
谷氨酸脱氢酶 GDH/(U/g prot)	12.17±0.62	9.76±0.76	9.47±1.22	9.43±0.89	12.08±0.28
丙二醛 MDA/(μmol/g prot)	5.56±0.78	5.49±0.57	4.79±0.32	4.58±0.43	5.90±0.61

2.6 橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼幼鱼体组成的影响

由表 8 可知，各组间罗非鱼幼鱼水分、粗蛋白质、粗脂肪和粗灰分含量均无显著差异(P>0.05)。

表 8 橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼幼鱼体组成的影响

Table 8 Effects of fish oil replacement by rubber seed oil on body composition of juvenile GIFT %

项目 Items	组别 Groups				
	G0	G25	G50	G75	G100
水分 Moisture	68.65±0.25	68.41±0.18	69.19±0.47	69.02±0.48	68.69±0.15
粗蛋白质 Crude protein	16.42±0.18	16.86±0.10	16.51±0.19	16.55±0.12	16.53±0.10
粗脂肪 Ether extract	10.43±0.24	10.68±0.29	10.09±0.20	10.30±0.35	10.90±0.18
粗灰分 Ash	4.00±0.29	4.01±0.18	4.09±0.07	4.00±0.11	3.94±0.07

3 讨 论

3.1 橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼幼鱼生长性能的影响

本研究结果显示，随着饲料中橡胶籽油替代鱼油比例的升高，罗非鱼生长性能并无显著差异。国内外部分研究也表明，植物油替代鱼油对鱼类的生长未性能未造成显著影响[16-20]。如 Teoh 等[16]在饲料中用混合植物油(棕榈油、亚麻油、橄榄油和葵花油)完全替代鱼油饲喂吉富罗非鱼，发现对其罗非鱼的生长性能无明显负面影响。当亚麻籽油完全替代鱼油时，对鲶鱼(*Silurus asotus*)[21-22]和虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)[23]的生长性能也未造成显著影响，另外，对鲶鱼[17]、大西洋鲑(*Salmo salar*)[18]和虹鳟[19]的研究也表明，用棕榈油替代不同比例鱼油也不会影响鱼类的生长性能。然而，Turchini 等[4]研究指出，鱼类的生长与饲料中的 n-3 PUFA 含量密切相关，当饲料中 n-3 PUFA 含量不足时会造成鱼类的生长性能下降。雍文岳[24]也发现，在罗非鱼饲料中添加含有高比例亚油酸的植物油更有利于其生长。这表明，罗非鱼对必需脂肪酸的需要种类确实存在分歧，本试验结果显示，橡胶籽油全部替代鱼油时对吉富罗非鱼幼鱼的生长性能没有负面影响，可能是由于橡胶籽油高比例替代鱼油后仍能满足吉富罗非鱼幼鱼对 n-3 PUFA 的需求，也可能与饲料中亚油酸含量的升高有关。由此可见，

罗非鱼同时需要 n-3、n-6 PUFA，两者具有相同的效果。

3.2　橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼幼鱼消化酶活性的影响

消化酶活性的高低是反映机体对营养物质消化吸收能力的重要指标，鱼体消化酶活性的升高有利于其对营养物质的消化和吸收[25]。鱼体中脂肪酶对中性脂肪的消化具有重要作用，其能将脂肪的酯键切断，生成脂肪酸[26-27]，Rajas 等[28]研究表明，饲料中 PUFA 含量的升高有利于胰蛋白酶的转录和 mRNA 的表达。本试验结果显示，G25 组罗非鱼幼鱼肠道中的脂肪酶、胰蛋白酶活性显著高于其他各组，脂肪酶活性的升高说明适量的橡胶籽油替代鱼油可提高罗非鱼的消化能力，从而有助于其对营养物质的吸收消化。周景祥等[29]研究表明，鱼类肝脏主要分泌蛋白酶原，进入肠道后由肠激酶激活，从而促进肠道对饲料蛋白质的消化吸收。倪寿文等[30]对不同鱼类淀粉酶活性的研究认为，肝胰脏是分泌淀粉酶的主要器官，并在肠道中被激活。本试验中，随着橡胶籽油替代比例的提高，二糖酶的活性呈逐渐降低趋势，说明橡胶籽油含量较高时会影响罗非鱼对碳水化合物的吸收利用。

3.3　橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼幼鱼脂蛋白含量的影响

血液生化指标能反映鱼体一段时间内生理代谢情况，与鱼类在此期间的营养状况紧密相关。当鱼体发生生理变化时，血液生化指标能迅速反映其机体的营养代谢情况[31]。脂肪在体内主要以 LDL-C、HDL-C 等形式在血液中转运，TC 在血液中与脂蛋白结合成 HDL-C 并转运到肝脏分解，减少 TC 在血管壁的沉积，而 LDL-C 过量易引发动脉硬化[32]。因此，LDL-C/HDL-C 可反映胆固醇的转运情况，是动脉粥样硬化的衡量指标。胆固醇不仅是合成肾上腺皮质激素、性激素、胆汁酸及维生素 D 等生理活性物质的重要原料，也是构成细胞膜的主要成分，其血清含量可作为脂质代谢的指标，当其血清中 TC 含量过高时，可能会造成高胆固醇血症。Peng 等[33]对黑鲷(*Sparus macrocephlus*)幼鱼的研究中表明，饲料中用豆油替代鱼油会降低其血清 TC 含量。本试验研究发现，随着橡胶籽油替代比例的提高，吉富罗非鱼血清 TC 含量呈逐渐下降的趋势，其原因可能是由于饲料中不饱和脂肪酸含量升高，使胆固醇酯化，进而降低了血清中的 TC 含量。本研究结果表明，G0 和 G25 组 LDL-C/HDL-C 显著高于其他各组，说明橡胶籽油高比例替代鱼油后可降低罗非鱼“动脉粥样硬化”

发病率。而在 Torstensen 等[34]研究中发现，饲料中棕榈油完全替代鱼油时，大西洋鲑鱼血清中 TG 含量未受到显著影响，这与本试验结果相似。另有研究表明，植物油完全替代饲料中的鱼油会降低大西洋鲑血清中的 LDL-C 含量[35]。这与本试验随着橡胶籽油替代鱼油比例提高，血清 LDL-C 含量逐渐降低的结果相一致。然而，Torstensen 等[34]研究发现，饲料中棕榈油全部替代鱼油时，对大西洋鲑血清 LDL-C 和 HDL-C 的含量并未造成显著影响。此外，肝脏是鱼类合成胆固醇的主要器官。研究表明，CE 是由 FC 与脂肪酸于肝脏内在卵磷脂胆固醇脂酰转移酶(LCAT)作用下结合而成，同时也可以由水解酶水解成 FC。本试验结果表明，橡胶籽油替代鱼油比例对罗非鱼肝脏 TC 和 TG 含量均无显著影响，FC 含量和 FC/TC 呈先下降后上升的趋势；相反，CE 则呈先上升后下降的趋势。这说明高比例橡胶籽油替代鱼油会对罗非鱼体内胆固醇的吸收造成一定的影响。

3.4　橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼幼鱼蛋白质代谢的影响

蛋白质代谢主要发生在动物体的肝脏中，而转氨酶却广泛存在于机体的各组织中。转氨酶主要存在于机体肝脏组织细胞内，而血液中的活性较低，当机体营养不平衡或受到外界环境影响，尤其是肝脏受损时，转氨酶就会被释放到血液里，导致血浆中 ALT 和 AST 活性升高[36]。本试验中，各组血浆和肝脏 ALT 和 AST 活性无显著差异，说明橡胶籽油替代鱼油对罗非鱼肝脏没有造成明显的负面影响。类似地，GGT 则也是反映肝胆疾病的指标，主要存在于具有吸收、排泄功能的组织细胞内，它只有在特定的条件下才会被释放到血液中，以此来检验组织细胞的病变[37-39]。本试验中，G25 组血浆 GGT 活性虽然显著高于 G50、G75 组，但与 G0 组无显著差异，说明橡胶籽油替代鱼油可能会影响罗非鱼体内蛋白质代谢以及细胞内外氨基酸的转运速度，但并没有对其肝脏造成损伤。氨氮是蛋白质代谢过程中氨基酸脱氨基后的产物，也是鱼体含氮物质代谢的产物，代谢物主要以 UN 的形式从尿中排出。动物体内氨氮浓度会随氨基酸代谢的改变而发生变化，氨氮浓度的变化反映了氨基酸氧化程度的强弱，与氨基酸代谢强弱有关。正常情况下，血液中氨氮浓度与机体的蛋白质呈负相关[37]。本试验中血浆 UN 含量呈上升的趋势，但差异不显著，而血浆 UN 含量的升高意味着机体蛋白质分解速度增加，体内氨基酸被作为能量消耗而没有被储存，从而使蛋白质的沉积减少。因此，

高比例的橡胶籽油不利于罗非鱼的蛋白质沉积。

3.5 橡胶籽油替代鱼油对吉富罗非鱼幼鱼抗氧化功能的影响

研究表明，动物机体的抗氧化能力与其健康状态有密切的联系，抗氧化能力降低会造成动物各类疾病的发生[40]。T-AOC 是鱼类抗氧化能的总体表现，是体内抗氧化能力的总和[41]，而 GR 则在氧化胁迫反应中对活性氧的清除起到关键作用。本试验结果表明，随着橡胶籽油替代鱼油比例的提高，肝脏 T-AOC 及血浆 GR 活性均呈现逐渐下降的趋势。类似地，潘瑜等[42]用亚麻籽油替代鱼油发现，随着亚麻籽油替代比例的提高，显著降低了鲤鱼(*Cyprinus carpio*)的肝脏 T-AOC。这说明当橡胶籽油全部替代鱼油时会显著降低罗非鱼的抗氧化能力，影响吉富罗非鱼的免疫和防御能力，使鱼体的免疫力机能降低。NO 能够清除机体内活性氧，但当其过量时则会对机体抗氧化能力起到抑制作用[43]。本试验显示，G50 组血浆 NO 含量显著低于 G100 组，而与其他各组差异不显著，这可能是由于当橡胶籽油全部替代鱼油会使血浆 NO 含量过量，抑制了罗非鱼的抗氧化功能。研究表明，在鱼类的正常新陈代谢过程中机体会不断产生一些自由基，而为了防止这些自由基过量，机体内就存在如 CAT、GSH-Px 等清除这些自由基的物质，这些酶通过及时清除体内积累的自由基，起到保护机体的作用[44]。而 MDA 是一种过氧化脂质的降解产物，其含量的高低反映的是机体细胞遭受自由基攻击的程度[45]。本试验中橡胶籽油替代鱼油对罗非鱼血浆和肝脏 MDA 含量、CAT 活性及血浆 GSH-Px 活性都没有显著影响。这与 Peng 等[33]发现的豆油替代鱼油会降低黑鲷肝胰脏 MDA 含量结果不一致。这可能是由于鱼的种类不同以及脂肪源不同引起的。综上所述，饲料中橡胶籽油替代鱼油比例低于 75%时对罗非鱼抗氧化能力没有明显的不良影响，但当橡胶籽油 100%替代鱼油时，会使罗非鱼的抗氧化功能有所下降。

4 结 论

橡胶籽油替代 25%~75%的鱼油对罗非鱼生长性能和抗氧化功能等均无明显负面影响。当橡胶籽油替代鱼油比例为 25%时，有利于改善罗非鱼肠道消化酶活性；但当橡胶籽油替代鱼油比例达到 100%时，罗非鱼抗氧化功能有所下降。

参考文献：

[1] TRICHET V V.Nutrition and immunity:an update[J].Aquaculture Research,2010,41(3):356–372.

[2] TAKEUCHI T.Essential fatty acid requirements in carp[J].Archiv für Tierernährung,1996,49(1):23–32.

[3] PICKOVA J,MØRKØRE T.Alternate oils in fish feeds[J].European Journal of Lipid Science & Technology,2010,109(3):256–263.

[4] TURCHINI G M,TORSTENSEN B E.Fish oil replacement in finfish nutrition[J].Reviews in Aquaculture,2010,1(1):10–57.

[5] 易新文,张文兵,麦康森,等.饲料中菜籽油替代鱼油对大黄鱼生长、肌肉脂肪酸组成和体色的影响[J].水产学报,2013,37(5):751–760.

[6] 赵瀛华,范武平,范武波.橡胶籽的全成分开发与利用[J].热带农业工程,2013,37(2):46–49.

[7] NARAHARI D,KOTHANDARAMAN P.Chemical composition and nutritional value of para-rubber seed and its products for chickens[J].Animal Feed Science & Technology,1984,10(4):257–267.

[8] 董杰明,吴瑞华,袁昌鲁,等.γ-亚麻酸的保健作用[J].卫生研究,2003,32(3):299–301.

[9] HOLLMANN M,BEEDE D K.Comparison of effects of dietary coconut oil and animal fat blend on lactational performance of Holstein cows fed a high-starch diet[J].Journal of Dairy Science,2012,95(3):1484–1499.

[10] BAHURMIZ O M,NG W K.Effects of dietary palm oil source on growth,tissue fatty acid composition and nutrient digestibility of red hybrid *tilapia*,*Oreochromis* sp. raised from stocking to marketable size[J].Aquaculture,2007,262(2/3/4):382–392.

[11] 文远红,米海峰,张璐,等.棕榈油替代大豆油对吉富罗非鱼幼鱼生长性能、肌肉营养组成和血清生化指标的影响[J].动物营养学报,2016,28(3):953–960.

[12] KANAZAWA A,TESHIMA S,SAKAMOTO M,et al.Requirements of *Tilapia zillii* for essential fatty

acid[J].Nippon Suisan Gakkaishi,1980,46(11):1353–1356.

[13] HUANG C H,HUANG M C,HOU P C.Effect of dietary lipids levels on fatty acid composition and lipid peroxidation in sarcoplasmic reticulum of hybrid tilapia,*Oreochromis niloticus* × *O.aureus*[J].Comparative Biochemistry and Physiology Part B:Biochemistry and Molecular Biology,1998,120(2):331–336.

[14] CHOU R L,SU M S,CHEN H Y.Optimal dietary protein and lipid levels for juvenile cobia (*Rachycentron canadum*)[J].Fisheries Science & Technology,2003,193(1/2):81–89.

[15] DENG J M,MAI K S,CHEN L Q,et al.Effects of replacing soybean meal with rubber seed meal on growth,antioxidant capacity,non-specific immune response,and resistance to *Aeromonas hydrophila*,in tilapia (*Oreochromis niloticus*×*O. aureus*)[J].Fish & Shellfish Immunology,2015,44(2):436–444.

[16] TEOH C Y,TURCHINI G M,NG W K.Genetically improved farmed Nile tilapia and red hybrid tilapia showed differences in fatty acid metabolism when fed diets with added fish oil or a vegetable oil blend[J].Aquaculture,2011,312(1/2/3/4):126–136.

[17] NG W K,LIM P K,BOEY P L.Dietary lipid and palm oil source affects growth,fatty acid composition and muscle α-tocopherol concentration of African catfish,*Clarias gariepinus*[J].Aquaculture,2003,215(1/2/3/4):229–243.

[18] BELL J G,MCEVOY L A,ESTEVEZ A,et al.Optimising lipid nutrition in first-feeding flatfish larvae[J].Aquaculture,2003,227(1/2/3/4):211–220.

[19] FONSECA-MADRIGAL J,KARALAZOS V,CAMPBELL P J,et al.Influence of dietary palm oil on growth,tissue fatty acid composition,and fatty acid metabolism in liver and intestine in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J].Aquaculture Nutrition,2005,11(4):241–250.

[20] 王炳谦,徐奇友,徐连伟,等.豆油代替鱼油对哲罗鱼稚鱼生长和体成分的影响[J].中国水产科学,2006,13(6):1023–1027.

[21] HENDERSON R J,TOCHER D R.The lipid composition and biochemistry of freshwater fish[J].Progress in Lipid Research,1987,26(4):281–347.

[22] ASDARI R,ALIYU-PAIKO M,HASHIM R.Effects of different dietary lipid sources in the diet for *Pangasius nasutus* (Bleeker,1863) juveniles on growth performance,feed efficiency,body indices and muscle and liver fatty acid composition[J].Aquaculture Nutrition,2011,17(4):e883–e891.

[23] MASIHA A,SOOFIANI N M,EBRAHIMI E,et al.Effect of dietary flaxseed oil level on the growth performance and fatty acid composition of fingerlings of rainbow trout,*Oncorhynchus mykiss*[J].SpringerPlus,2013,2:1.

[24] 雍文岳.尼罗罗非鱼营养需要量[J].淡水渔业,1994,24(5):22–24.

[25] DAS K M,TRIPATHI S D.Studies on the digestive enzymes of grass carp,*Ctenopharyngodon idella* (Val.)[J].Aquaculture,1991,92:21–32.

[26] OLSEN R E,HENDERSON R J,RINGO E.The digestion and selective absorption of dietary fatty acids in Arctic charr,*Salvelinus alpinus*[J].Aquaculture Nutrition,2015,4(1):13–21.

[27] MURRAY H M,GALLANT J W,PEREZ-CASANOVA J C,et al.Ontogeny of lipase expression in winter flounder[J].Journal of Fish Biology,2003,62(4):816–833.

[28] RAJAS F,GAUTIER A,BADY I,et al.Polyunsaturated fatty acyl coenzyme A suppress the glucose-6-phosphatase promoter activity by modulating the DNA binding of hepatocyte nuclear factor 4 alpha[J].Journal of Biological Chemistry,2002,277(18):15736–15744.

[29] 周景祥,陈勇,黄权,等.鱼类消化酶的活性及环境条件的影响[J].北华大学学报:自然科学版,2001,2(1):70–73,83.

[30] 倪寿文,桂远明,刘焕亮.草鱼、鲤、鲢、鳙和尼罗非鲫淀粉酶的比较研究[J].大连水产学院学报,1992,7(1):24–31.

[31] 高露姣,施兆鸿,艾春香,等.不同脂肪源对施氏鲟幼鱼血清生化指标的影响[J].海洋渔

业,2005,27(4):319–323.

[32] BARCELLOS L J G,KREUTZ L C,DE SOUZA C,et al.Hematological changes in jundiá (*Rhamdia quelen* Quoy and Gaimard *Pimelodidae*) after acute and chronic stress caused by usual aquacultural management,with emphasis on immunosuppressive effects[J].Aquaculture,2004,237(1/2/3/4):229–236.

[33] PENG S M,CHEN L Q,QIN J G,et al.Effects of replacement of dietary fish oil by soybean oil on growth performance and liver biochemical composition in juvenile black seabream,*Acanthopagrus schlegeli*[J].Aquaculture,2008,276(1/2/3/4):154–161.

[34] TORSTENSEN B E,LIE Ø,FRØYLAND L.Lipid metabolism and tissue composition in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)-effects of capelin oil,palm oil,and oleic acid-enriched sunflower oil as dietary lipid sources[J].Lipids,2000,35(6):653–664.

[35] JORDAL A E O,LIE Ø,TORSTENSEN B E.Complete replacement of dietary fish oil with a vegetable oil blend affect liver lipid and plasma lipoprotein levels in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)[J].Aquaculture Nutrition,2007,13(2):114–130.

[36] DEPLANO M,CONES R,DIAZ J P,et al.Intestinal steatosis in the farm-reared sea bass *Dicentrarchus labrax*[J].Diseases of Aquatic Organisms,1989,6:121–130.

[37] RITZHAUPT L K,BAHR J M.A decrease in FSH receptors of granulosa cells during follicular maturation in the domestic hen[J].Journal of Endocrinology,1987,115(2):303–310.

[38] LIN D,MAO Y Q,CAI F S.Nutritional lipid liver disease of grass carp *Ctenopharyngodon idullus* (C. et V.)[J].Chinese Journal of Oceanology and Limnology,1990,8(4):363–373.

[39] AUTHMAN M M N,ABBAS W T,ABUMOURAD I M K,et al.Effects of illegal cyanide fishing on vitellogenin in the freshwater African catfish,*Clarias gariepinus* (Burchell,1822)[J].Ecotoxicology & Environmental Safety,2013,91:61–70.

[40] TRENZADO C,HIDALGO M C,GARCÍA-GALLEGO M,et al.Antioxidant enzymes and lipid peroxidation in sturgeon Acipenser naccarii and trout *Oncorhynchus mykiss*.A comparative study[J].Aquaculture,2006,254(1/2/3/4):758–767.

[41] 吴强强,李国富,吴江,等.牛至油对建鲤生长性能和血清抗氧化能力的影响[J].湖南农业科学,2010(5):136–138.

[42] 潘瑜,陈文燕,林仕梅,等.亚麻油替代鱼油对鲤鱼生长性能、肝胰脏脂质代谢及抗氧化能力的影响[J].动物营养学报,2014,26(2):420–426.

[43] 吴红松.三聚氰胺对鲤鱼组织SOD、POD和MDA含量的影响[J].动物医学进展,2012,33(5):74–77.

[44] 田文静.饲料中添加硒和镁对中华绒螯蟹幼蟹生长、抗氧化性能的影响[D].硕士学位论文.上海:华东师范大学,2014.

[45] MCCORD J M,FRIDOVICH I.An enzymic function for erythrocuprein (hemocuprein)[J].The Journal of Biological Chemistry,1969,244(22):6049–6155.

Effects of Fish Oil Replacement by Rubber Seed Oil on Growth Performance, Digestive Enzyme Activity, Lipoprotein Content and Antioxidant Capacity of Juvenile Genetically Improved Farmed Tilapia (*Oreochromis niloticus*)

ZHANG Xindang ZHANG Xi TAO Linli YANG Xiujuan BI Baoliang DENG Junming*

(*College of Animal Science and Technology*, *Yunnan Agricultural University*, *Kunming* 650201, *China*)

Abstract: This study was conducted to evaluate the effects of fish oil replacement by rubber seed oil on growth performance, digestive enzyme activity, lipoprotein content and antioxidant capacity of juvenile genetically improved farmed tilapia (GIFT) (*Oreochromis niloticus*). A total of 600 healthy juvenile GIFT with similar body weight were randomly divided into 5 groups with 3 replicates per group and 40 fish per replicate, and fed with their respective diet from the five isonitrogenous and isolipids diets, in which 0 (G0, as control), 25% (G25), 50% (G50), 75% (G75) and 100% (G100) fish oil were replaced with rubber seed oil in a basal diet. The experiment lasted for 8 weeks. The results showed as follows: 1) there was no significant difference in final body weight, weight gain, daily gain coefficient, feeding rate, feed conversion

rate and protein efficiency ratio of juvenile GIFT among all groups (P>0.05). 2) The activities of trypsin and lipase in intestine of juvenile GIFT in group G25 were significantly higher than those in the other groups (P<0.05), the intestinal amylase activity of juvenile GIFT in group G25 was significantly higher than that in group G75 (P<0.05). There was no significant difference in activities of trypsin, amylase and disaccharidase in liver of juvenile GIFT among all groups (P>0.05). 3） With the percentage of oil replacement by rubber seed oil increasing, the contents of total cholesterol (TC) and low density lipoprotein cholesterin (LDL-C) in serum of juvenile GIFT general showed a downward trend, and the liver free cholesterol (FC) content and FC/TC was firstly decreased and then increased, which group G25 got the lowest. 4) The plasma glutathione reductase (GR) activity of juvenile GIFT in group G0 was significantly higher than that in the other groups (P<0.05), the liver GR activity of juvenile GIFT in group G0 was significantly higher than that in groups G50 and G100 (P<0.05), and the liver total antioxidant capacity of juvenile GIFT in group G100 was significantly lower than that in the other groups (P<0.05). In summary, replacing 25% to 75% fish oil with rubber seed oil has no obvious negative effects on growth performance, and antioxidant capacity. 25% fish oil replacement by rubber seed oil is beneficial to improve the intestinal digestive enzyme activity of juvenile GIFT; when 100% fish oil replacement by rubber seed oil, the antioxidant capacity of juvenile GIFT is decreased.

Key words: GIFT (*Oreochromis niloticus*); rubber seed oil; fish oil; growth performance; digestive enzyme activity; antioxidant capacity

*Corresponding author, professor, E-mail: djunming@163.com

（责任编辑　武海龙）